

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ В КАРБОНИЗИРОВАННОМ БЕТОНЕ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ ОТКРЫТОЙ АТМОСФЕРЫ

Васильев А. А.

Введение. Сегодня в мире производится от 3 до 4 м³ бетона и железобетона на человека в год [1]. Таким образом, железобетон является самым массовым конструкционным материалом, а железобетонные элементы (ЖБЭ) и конструкции (ЖБК) составляют основную долю элементов и конструкций зданий и сооружений.

Поскольку значительная часть ЖБЭ и ЖБК эксплуатируется в условиях открытой атмосферы, агрессивность по отношению к железобетону в ней определяется следующими основными эксплуатационными условиями: концентрация CO₂ – 0,03–1,20 %; относительная влажность – до 100 %; периодический переход температуры через 0 °С; периодическое увлажнение атмосферными осадками различной степени интенсивности.

В эксплуатационных условиях открытой атмосферы основным видом коррозии бетона в ЖБЭ и ЖБК, является его карбонизация. Нейтрализуя защитный слой, карбонизация создает условия для возникновения и развития коррозии стальной арматуры. В процессе ее развития происходит уменьшение поперечного сечения стальной арматуры с одновременным снижением механических характеристик, поэтому одним из важнейших вопросов оценки и прогнозирования технического состояния и долговечности ЖБЭ и ЖБК является установление зависимости скорости коррозии стальной арматуры при карбонизации защитного слоя бетона от его толщины, класса бетона по прочности и условий эксплуатации ЖБЭ и ЖБК.

Существующие методики оценки карбонизации бетона, основанные на фенолфталейновом тесте (ФФТ), рассматривают только два состояния бетона – «здоровый», сохраняющий защитные свойства по отношению к стальной арматуре и карбонизированный, способствующий возникновению и развитию коррозии, не позволяют оценивать скорость развития коррозии стальной арматуры и ее изменение по сечению карбонизированного бетона.

Так, скорость коррозии стальной арматуры в условиях открытой атмосферы в соответствии с [2]:

$$V_{corr} = V_{corr,a} \cdot \frac{N_w}{365}, \quad (1)$$

где $V_{cor,ar}$ – средняя скорость коррозии стальной арматуры, мм/год, определяемая условиями эксплуатации; в соответствии с [1] при эксплуатации на открытом воздухе $V_{cor,ar} = 0,005$ мм/год, N_w – количество дней в году с осадками более 2,5 мм.

Предлагаемая зависимость, не учитывает такие важнейшие факторы, как класс бетона по прочности (состав бетона), толщина защитного слоя и др.

Основная часть. Для возможности определения скорости развития коррозии стальной арматуры в карбонизированном защитном слое бетона были использованы результаты многолетних исследований карбонизации бетона и ее влияния на изменение состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре и состояния стальной арматуры [2–6] для различных классов бетона по прочности.

Так, на основании предложенного показателя степени карбонизации бетона (показателя СК), выявленной зависимости коррозионного состояния стальной арматуры, определяемого величиной водородного показателя щелочности поровой жидкости в зоне расположения арматуры, от степени карбонизации бетона в зоне ее расположения (таблица 1) и полученных регрессионных зависимостей изменения во времени по сечению степени карбонизации бетонов различных классов по прочности (выражение 2 и таблица 2) был выполнен анализ времени наступления граничных значений степеней карбонизации для классов бетона по прочности C¹²/₁₅–C³⁰/₃₇ эксплуатационных условий открытой атмосферы.

Таблица 1 – Взаимосвязь состояния стальной арматуры, параметров рН и СК

Категория потери защитных свойств бетона	Граничные значения показателя рН	Степень карбонизации, СК	Граничные значения показателя СК, %	Глубина коррозионного повреждения стальной арматуры, мм
0	> 11,80	0	<13	–
I	11,80–10,80	I	13–26	До 0,20
II	< 10,80–10,30	II	> 26–36	“ “ 0,50
III	< 10,30–9,80	III	> 36–47	“ “ 0,90
IV	< 9,80–9,00	IV	> 47–74	“ “ 1,50
V	< 9,00	V	> 74	> 1,50

Усредненная регрессионная зависимость изменения степени карбонизации во времени по сечению бетонов классов по прочности $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$ для различных степеней агрессивности воздушных сред в общем виде:

$$СК(l,t) = \alpha_1 + (\alpha_2 + \alpha_3 \sqrt{t}) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)} / \alpha_4 \alpha, \quad (2)$$

где α – степень гидратации цемента, %; α_1 – α_4 – коэффициенты, t – время, эксплуатации, лет.

Значения коэффициентов α_1 – α_4 для бетонов классов по прочности $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$ усредненных составов, эксплуатационных условий открытой атмосферы приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения показателей α_1 – α_4

Класс бетона по прочности на сжатие	α_1	α_2	α_3	α_4
$C^{12}/_{15}$	2,39	0,500	0,962	19,5
$C^{16}/_{20}$	2,77	0,565	0,906	25,8
$C^{18}/_{22,5}$	3,04	0,585	0,869	28,3
$C^{20}/_{25}$	3,22	0,625	0,843	30,8
$C^{22}/_{27,5}$	3,39	0,655	0,818	32,6
$C^{25}/_{30}$	3,62	0,710	0,782	35,4
$C^{28}/_{35}$	4,12	0,760	0,717	40,2
$C^{30}/_{37}$	4,32	0,790	0,692	42,0

По его результатам были построены регрессионные зависимости изменения во времени коррозионного повреждения стальной арматуры для фиксированных значений толщин защитного слоя бетона 10, 15, 20 и 25 мм классов по прочности $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$ условий эксплуатации открытой атмосферы. бетонов

В качестве примера на рисунке 1 приведены в графическом виде регрессионные зависимости глубины коррозионного повреждения стальной арматуры от толщины защитного слоя бетонов классов по прочности $C^{16}/_{20}$, $C^{20}/_{25}$ и $C^{30}/_{37}$ для эксплуатационных условий открытой атмосферы.

Регрессионные зависимости для остальных классов бетона по прочности получены аналогично.

Результаты исследований показывают, что коррозионные повреждения стальной арматуры развиваются по сложной экспоненциальной зависимости и их скорость зависит от толщины защитного слоя бетона и класса бетона по прочности.

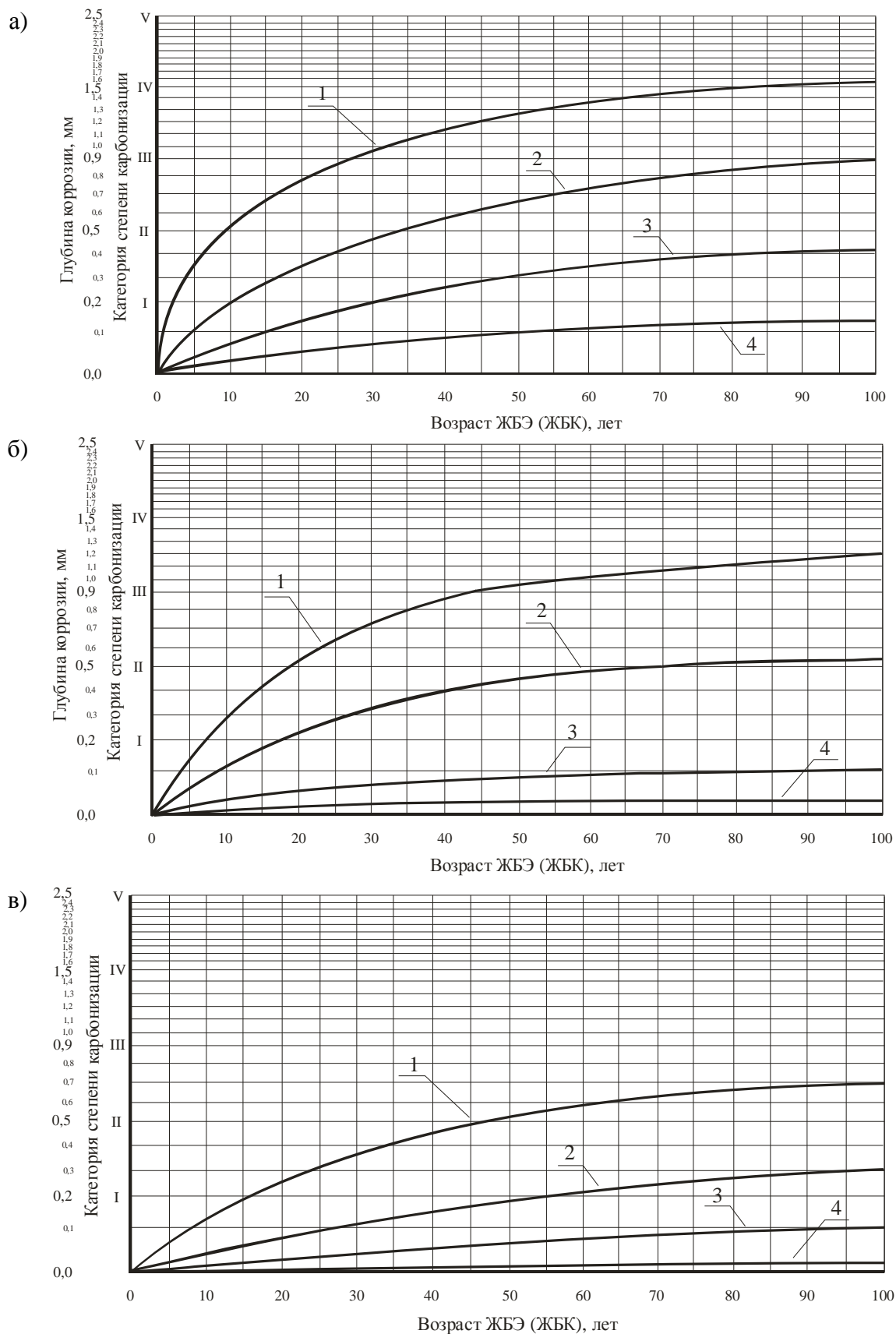


Рисунок 1 – Регрессионные зависимости глубины коррозионных повреждений стальной арматуры от толщины защитного слоя для условий открытой атмосферы бетонов классов по прочности: а) $C^{16}_{/20}$; б) $C^{20}_{/25}$; в) $C^{30}_{/37}$: толщина защитного слоя бетона: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20; 4 – 25 мм

Полученный характер зависимостей и физический смысл задачи оценки глубины повреждения стальной арматуры, позволили предложить в общем виде регрессионную зависимость скорости повреждения стальной арматуры для фиксированных значений толщины защитного слоя бетона и экспоненциального характера развития коррозии стальной арматуры:

$$h(t) = \alpha_0 \cdot (1 - e^{-\alpha_1 \cdot t}), \quad (3)$$

где h – глубина коррозии стальной арматуры, мм; t – время эксплуатации, годы; α_0 и α_1 – коэффициенты, определяющие соответственно: α_0 – максимальную скорость коррозии при $t = \infty$; α_1 – скорость развития процесса коррозии.

При получении регрессионной зависимости принимали граничное значение времени эксплуатации – 100 лет.

Коэффициенты α_0 и α_1 определялись автоматизировано методом наименьших квадратов в разделе «Nonlinear regression» компьютерного пакета статистического анализа данных «Statgraphics Centurion».

Полученные значения коэффициентов α_0 и α_1 для бетонов классов по прочности $C^{16}/_{20}$, $C^{20}/_{25}$ и $C^{30}/_{37}$ фиксированных значений толщины защитного слоя, условий открытой атмосферы, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения показателей α_0 и α_1

Класс бетона по прочности на сжатие	Толщина защитного слоя, мм							
	10		15		20		25	
	α_0	α_1	α_0	α_1	α_0	α_1	α_0	α_1
$C^{16}/_{20}$	1,5709	0,0366	1,0263	0,0212	0,5763	0,0148	0,1858	0,0174
$C^{20}/_{25}$	1,4543	0,0237	0,9966	0,0118	0,3034	0,0147	0,0911	0,0264
$C^{30}/_{37}$	0,8509	0,0190	0,6048	0,0073	0,2773	0,0056	0,2119	0,0059

Для получения зависимости развития коррозии стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона (для каждого класса бетона по прочности) необходимо установить зависимость параметров a_0 и a_1 (по 4 толщинам защитного слоя) для различных толщин защитного слоя (s).

Методами регрессионного анализа по диаграммам рассеяния $a_0(s)$ и $a_1(s)$ было установлено, что эффективным образом данные зависимости описываются аппроксимирующими уравнениями гипербол:

$$a_0(s) = b_0 + b_1/s, \quad (4)$$

$$a_1(s) = c_0 + c_1/s, \quad (5)$$

где – b_0 , b_1 , c_0 , c_1 – коэффициенты; s – толщина защитного слоя бетона, мм.

Таким образом, для бетонов классов по прочности $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$ уравнение (1) для оценки величины коррозии стальной арматуры в зависимости от толщины защитного слоя бетона приобретает следующий вид:

$$h(t) = \left(b_0 + \frac{b_1}{s} \right) \cdot (1 - e^{-(c_0 + \frac{c_1}{s}) \cdot t}). \quad (6)$$

Параметры гипербол определялись автоматически в разделе «Simple regression» пакета «Statgraphics Centurion» методом наименьших квадратов.

Полученные значения коэффициентов b_0 , b_1 , c_0 , c_1 для бетонов классов по прочности $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$, условий открытой атмосферы, приведены в таблице 4.

На основании вышеприведенных исследований, выражение для оценки скорости коррозии стальной арматуры в карбонизированном бетоне:

$$v(t) = a_0 \cdot a_1 \cdot \exp(-a_1 \cdot t). \quad (7)$$

Кроме того, приняв, нормативный срок эксплуатации железобетонных элементов 50 лет, оценив среднюю скорость коррозии стальной арматуры за данный период для граничных толщин защитного слоя бетонов различных классов по прочности, получили, в графическом выражении, зависимости средней скорости коррозии стальной арматуры от толщины защитного слоя для бетонов классов по прочности $C^{12}_{/15}$ – $C^{30}_{/37}$ (рисунок 3). Они показывают, что средняя скорость коррозии стальной арматуры уменьшается по сечению бетона с поверхности вглубь по сложной зависимости, причем с уменьшением толщины защитного слоя бетона (менее 20 мм) она значительно выше расчетной по [1] (приняв, по данным Гидрометцентра для г. Гомеля, $N_w = 300$, скорость коррозии стальной арматуры в карбонизированном бетоне в условиях открытой атмосферы составит $V_{cor} = 0,0041$ мм/год).

Таблица 4 – Значения показателей b_0 , b_1 , c_0 и c_1

Класс бетона по прочности на сжатие	Коэффициент			
	b_0	b_1	c_0	c_1
$C^{12}_{/15}$	-0,754420	32,3350	0,002997	0,332003
$C^{16}_{/20}$	-0,622000	26,4950	0,000310	0,305000
$C^{18}_{/22,5}$	-0,522100	22,6725	-0,001990	0,279000
$C^{20}_{/25}$	-0,439000	19,8800	-0,003500	0,258000
$C^{22}_{/27,5}$	-0,391000	17,0900	-0,004800	0,241000
$C^{25}_{/30}$	-0,319000	14,9950	-0,005200	0,232000
$C^{28}_{/35}$	-0,278000	13,0010	-0,005350	0,229900
$C^{30}_{/37}$	-0,251132	11,3354	-0,005288	0,229624

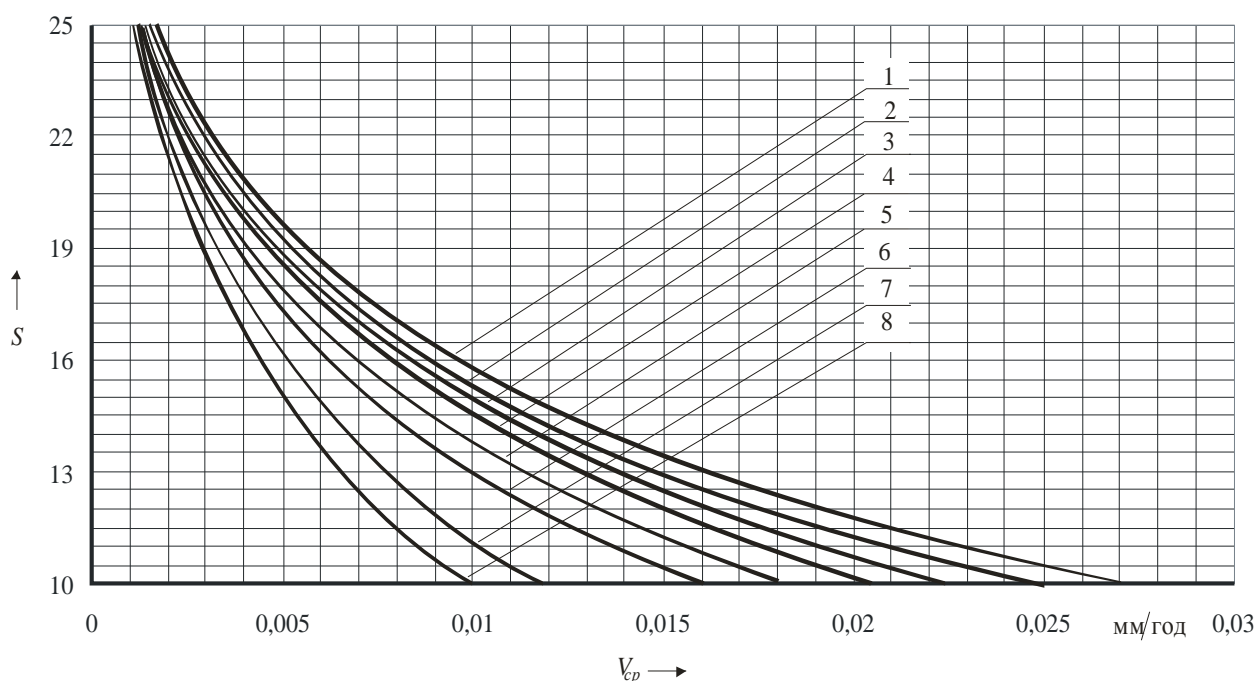


Рисунок 2 – Зависимости средней скорости коррозии стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона для условий открытой атмосферы
Классы бетона по прочности: 1 – $C^{12}_{/15}$; 2 – $C^{16}_{/20}$; 3 – $C^{18}_{/22,5}$; 4 – $C^{20}_{/25}$; 5 – $C^{22}_{/27,5}$; 6 – $C^{25}_{/30}$; 7 – $C^{28}_{/35}$; 8 – $C^{30}_{/37}$

Выводы. Выполненные исследования позволили получить регрессионные зависимости глубины коррозии и скорости коррозии стальной арматуры от толщины защитного слоя бетонов классов по прочности $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$ для эксплуатационных условий открытой атмосферы. Они позволяют учитывать скорость коррозии стальной арматуры в прогнозных моделях оценки технического состояния и долговечности ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в условиях открытой атмосферы.

Список источников

1. Железобетон в XXI веке: Состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России / Госстрой России; НИИЖБ.–М.: Готика, 2001.– 684 с.
2. DuraCrete 7: General guidelines for durability design and redesign. The European Union – Brite EuRam III, Project No. BE95-1347, Probabilistic Performance-based Durability Design of Concrete Structures, Report No. T7-01-1, 1999.
3. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
4. Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 304 с.
5. Васильев, А.А. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус.гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2016. – 263 с.
6. Васильев, А. А. Совершенствование оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях / А. А. Васильев // Проблемы современного бетона и железобетона. Сборник научных трудов. Вып. 9. – Минск, 2017. – С. 148–167.
7. Васильев, А. А., Оценка и прогнозирование степени карбонизации бетона / А.А. Васильев // Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования: монография / Под общ. ред. Г.Ю. Гуляева – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение – 2018. – С. 148–158.